

## Parámetros de fluidización de soja cruda, remojada y cocida

## Fluidization parameters of raw, soaked and cooked soybeans

Torrez Irigoyen RM, Giner SA

(1) CIDCA, UNLP- CONICET, La Plata, Argentina.

(2) Área Departamental Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNLP.

(3) Comisión de Investigaciones Científicas, Provincia de Buenos Aires  
ricardo\_mart2@yahoo.com.ar, saginer@ing.unlp.edu.ar.

### RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar los parámetros de fluidización con aire de soja cruda, remojada y cocida a efectos de delimitar un entorno de condiciones para el desarrollo de un proceso de secado/tostado en lecho fluidizado. Tal proceso conduce a un producto de soja crocante, listo para consumir, que no ha sido investigado. Se trabajó con soja variedad 5.5i provista por la empresa Don Mario Semillas. Se caracterizaron los tres materiales determinando su densidad y volumen de partícula por pycnometría. La humedad se determinó mediante un método de grano entero, resultando de 9,94% en soja cruda, 58,08% para soja remojada, y 59,90% en soja cocida (peso en peso). Los tres productos se fluidizaron a temperatura ambiente en un equipo construido para este propósito. La altura del lecho fijo ( $L_0$ ) fue de 0,10 m. Las densidades y porosidades de lecho fijo fueron: 744,66 kg/m<sup>3</sup> y 0,385 para soja cruda; 655,89 kg/m<sup>3</sup> y 0,399 para soja remojada y 680,62 kg/m<sup>3</sup> y 0,367 para soja cocida. La velocidad superficial del aire ( $V_0$ ) se midió con un anemómetro de hilo caliente y la diferencia de presión ( $\Delta p$ ) del aire a través del lecho, con un micromanómetro digital. Se observó un comportamiento de fluidización de lechos de partículas grandes, con burbujas de gran tamaño y alto grado de mezclado. Graficando los valores de  $\Delta p/L_0$  vs  $V_0$ , se observó, luego de la zona de lecho fijo, un comportamiento de transición entre éste y el de lecho fluidizado. Se ajustó una ecuación tipo Ergun a los datos de lecho fijo de cada producto para determinar los coeficientes laminar y turbulento, los que resultaron ser de 54,7 y 1,54 para soja seca, 64,31 y 0,85 en soja remojada, y 11,32 y 0,78 para soja cocida. A igual valor de  $V_0$ , los valores de  $\Delta p$  fueron mayores en soja cruda que en soja remojada y cocida. Sin embargo, las menores densidades de partícula de estas últimas amortiguan en cierto modo la diferencia de velocidades de mínima fluidización ( $V_{mf}$ ), que fueron calculadas por proyección de las respectivas ecuaciones tipo Ergun hasta el valor del peso del producto por unidad de sección transversal, resultando de 1,54 para soja cruda, 2,40 en soja remojada, y 2,31 m/s para soja cocida. Las velocidades de fluidización prácticas, determinadas en base a los gráficos de datos experimentales, fueron algo mayores, 1,6, 2,6 y 2,4 m/s, respectivamente. Conociendo la dependencia con la temperatura de la viscosidad y densidad del aire se estimó el efecto de la temperatura en la  $V_{mf}$ . Este resultó moderadamente importante: para un incremento de temperatura de 20 a 160 °C, la  $V_{mf}$  aumentó un 20% en promedio para los tres productos de soja.

Como conclusión, en este proceso, donde la soja cocida experimentará un cambio de tamaño y estructura hasta finalizar deshidratada y tostada, la velocidad de fluidización deberá reducirse gradualmente, de 2,7 a alrededor de 1,5 m/s, lo que requerirá control manual o automático, a efectos de ahorrar energía.

### ABSTRACT

The aim of this study was to determine the fluidization parameters of raw, soaked and cooked soybeans in order to find a range of operating conditions to develop a crispy, ready-to-eat, dehydrated soybean product which was not investigated yet. The cultivar used was 5.5i, provided by Don Mario Semillas company. The three materials were characterized by determining its particle size and density using a pycnometer. Moisture was determined using a whole grain method, resulting in 9.94% w / w for raw soybeans, 58.08 % for soaked soybeans and 59.90% in the cooked material. All three products were fluidized at room temperature in a purpose- built equipment. The height of the fixed bed ( $L_0$ ) was 0.10 m. Densities and porosities of the fixed bed were: 744.66 kg/m<sup>3</sup> and 0.385 for raw soybeans; 655.89 kg/m<sup>3</sup> and 0.399 for soaked soybeans and 680.62 kg/m<sup>3</sup> and 0.367 for cooked soybeans. Air

velocity ( $V_0$ ) was measured with a hot wire anemometer, while the air pressure drop ( $\Delta p$ ) through the bed, with a digital micromanometer. The observed fluidization behaviour corresponded to beds of large particles, with bubbles and high degree of mixing. By plotting of  $\Delta p/L_0$  vs  $V_0$  a transitional behavior was observed between the fixed and fluidized bed zones, which was more evident in soaked and cooked soybeans. An Ergun type equation was fitted to the fixed bed data of each product in order to determine the laminar and turbulent coefficients. These were 54.7 and 1.54, respectively, for dry soybeans, 64.31 and 0.85 in soaked soybeans and 11.32 and 0.78 for cooked soybeans. At equal  $V_0$ , the values of  $\Delta p$  were higher in raw soybeans, than in soaked or cooked soybeans. However, the lower densities of the two last materials reduced the differences in minimum fluidization velocity ( $V_{mf}$ ), calculated by extrapolating the predictions by the Ergun type equation up to the value of the product weight per unit cross section. These resulted of 1.54 m/s in raw soybeans, 2.40 m/s for soaked soybeans and 2.31 m/s in cooked soybeans. Practical fluidization velocities, determined on the basis of experimental data, were somewhat higher, 1.6, 2.6 and 2.4 m/s, respectively. Knowing the temperature dependence of air viscosity and density of, the effect of temperature on the  $V_{mf}$  was estimated. This was moderately important in all three products: by increasing air temperature from 20 to 160°C, the  $V_{mf}$  increased by an average of 20 % in the three soybean materials. In conclusion, for this fluidization process, where cooked soybeans will experience a structural change to finish dry and toasted, the fluidization velocity should have to be reduced gradually, from 2.7 to about 1.5 m/s, which will require manual or automatic control in order to save energy.

**PALABRAS CLAVE:** *soja, tostado, fluidizado, Ergun.*

**KEYWORDS:** *soybeans, toasted, fluidized, Ergun.*

## INTRODUCCIÓN

La soja (*Glycine max*) es una planta leguminosa que se destaca por su alto contenido de proteína y por su calidad nutritiva. Posee un 40% de proteína, 20% de lípidos (por lo que se considera oleaginosa), 25% de carbohidratos 5% de minerales y 10% de agua. El aceite está compuesto por triglicéridos y fosfolípidos (lecitina) que aportan ácidos grasos esenciales y fósforo, además de un bajo contenido de grasas saturadas, fitoesteroles y tocoferoles (vitamina E). Es fuente de vitaminas del complejo B, beta caroteno (provitamina-A), niacina, ácido pantoténico, ácido ascórbico (vitamina C) entre otros de acuerdo a lo informado en un documento realizado por el Consejo Nacional de Coordinación de Políticas Sociales (Presidencia de la Nación, 2003). La SAGPyA en su informe de producción de 2004, indicó que para la campaña 2003/2004, en Argentina la superficie ocupada con soja fue 14,5 millones de ha, con una producción de 31,5 millones de t. La producción se incrementó en la campaña 2004/2005 en la cual el cultivo de soja ocupó 14,7 millones de ha. Su producción se industrializa en más del 80% y es exportada casi en su totalidad representando un valor cercano a los 6200 millones de dólares (2003/2004), de acuerdo a lo especificado en el manual técnico elaborado por Bragachini y Casini (INTA-PRECOP, 2005). Debido a estos factores, la producción de soja ha crecido de manera notable en los últimos años, pasando de 12,6 millones de toneladas en el período 1996/97 a 40 millones en la campaña 2004/2005. En Argentina, la soja se seca artificialmente desde un contenido de humedad inicial de 16 a 17 % p/p a valores finales de 13 a 14 % p/p (b.h.) en los cuales se considera que alcanza la estabilidad durante el almacenamiento. Valores inferiores de humedad pueden causar desprendimiento de tegumento y la separación de los cotiledones, que resulta perjudicial si se piensa destinar esa soja a la exportación o a otro proceso posterior (Giner et al. 1994, de Dios 1996, Erickson 1995). Sin embargo, un proceso de secado demasiado rápido puede generar daño estructural, químico y biológico en el producto, por lo que la temperatura de aire en las secadoras no debería superar los 50-60 °C. La presencia de compuestos como inhibidores de tripsina, hemaglutininas, lecitinas y saponinas en soja cruda o no “desactivada” limita la utilización de los nutrientes, resultando en un compromiso para la salud. La existencia de estos factores antinutricionales hace necesario someter al grano de soja a un tratamiento térmico de inactivación. En nuestro caso, el tratamiento previo de remojo más la cocción produce la inactivación de la soja y permite utilizar el proceso de secado/tostado para otorgarle estabilidad en el almacenamiento y una textura y sabor atractivos. La fluidización es una alternativa novedosa y promisoría para el secado/tostado. En la industria

alimentaria la fluidización se aplica con éxito en el secado de productos lácteos (Kitic y Viollaz, 1984).

Cuando un gas circula a través de un lecho granular estático, experimenta una pérdida de presión que depende de diversas variables de operación como: la velocidad del gas, el espesor del lecho y el tamaño y forma de las partículas. Escardino et al. (1970), experimentando con arroz, cebada, trigo y maíz, desarrollaron una correlación empírica entre la caída de presión que experimenta el aire al circular a través de lechos de granos o semillas y las variables de proceso. La fluidización permite lograr una temperatura de producto uniforme en el lecho, con elevados coeficientes de transferencia de masa y energía. Esto debería conducir a una calidad de producto final más controlable comparada con otros métodos de secado convencionales Prachayawarakorn et al. (2006), Soponronnarit et al. (2008) y Osella et al. (1997) consideran al procesamiento en lecho fluidizado como una técnica muy adecuada para el tratamiento térmico de soja.

La inclusión de soja en la dieta ha representado en otros países una mejora en la calidad de la alimentación, al sumarse a culturas alimentarias basadas en arroz o maíz. No es ésta la situación en Argentina donde la mayor parte del grano de soja se exporta como aceite vegetal, harina desgrasada proteica y, recientemente, biodiesel. Si a esto se le suma el escaso hábito de consumo de legumbres enteras en Argentina, se comprende que la incorporación de la soja en la dieta requiere de un gran esfuerzo. Los únicos datos representativos referidos a la ingesta de legumbres en nuestra población se remiten a la Encuesta Nacional de Gasto e Ingreso de Hogares del INDEC en 1996-97; que indicaban un consumo estimado entre 2 o 3 porciones mensuales por unidad consumidora. Por lo tanto existe una gran oportunidad para incorporar la soja a la dieta, a través de un producto de mayor valor agregado exportable. Es importante indicar que no se ha encontrado bibliografía datos sobre fluidización de soja remojada y cocida, que es esencial para desarrollar un producto snack deshidratado/tostado con textura crocante listo para consumir. El producto se realizará en base a soja remojado o cocida. En consecuencia, el objetivo de este trabajo fue determinar los parámetros de fluidización con aire de soja cruda, remojada y cocida con el fin de obtener un entorno de condiciones operativas para el desarrollo del producto final.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con soja variedad 5.5i provista por la empresa Don Mario Semillas (Chacabuco, Provincia de Buenos Aires). Su humedad original fue de 9,94% p/p.

### Caracterización del grano

Se caracterizaron los tres tipos de muestra: soja seca (SS), soja remojada (SR) y soja cocida (SC). Se determinaron densidad y volumen de partícula por picnometría. El diámetro equivalente se calculó a partir del volumen de grano. Para el cálculo de la densidad de partícula ( $\rho_p$ ), se introdujo una muestra de 50 g en un matraz de 250 ml ( $V_{MZ}$ ), se lo llevó a aforo con agua destilada, y, conociendo el número de granos presentes ( $N_{TP}$ ), la masa de los mismos ( $m_{TP}$ ) y la densidad del agua empleada ( $\rho_{H_2O}$ ), se calculó el volumen del agua primero:

$$\rho_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{V_{H_2O}} \Rightarrow V_{H_2O}^0 \approx \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} \quad (1)$$

por diferencia entre el volumen del matraz a aforo= $V_{H_2O}^0$  y el de agua ( $V_{H_2O}$ ) que completa el volumen del matraz cargado con una masa  $m_{TP}$  de partículas, se obtiene el volumen total de partículas ( $V_{TP}$ ):

$$V_{TP} = (V_{H_2O}^0 - V_{H_2O}) \quad (2)$$

dado que la masa total de partículas es conocida, se calcula la densidad de partícula:

$$\rho_p = \frac{m_{TP}}{V_{TP}} \quad (3)$$

Por su parte, el volumen de partícula ( $V_p$ ) se calcula como sigue:

$$V_p = \frac{V_{TP}}{N_{TP}} \quad (4)$$

Conociendo este valor, y teniendo en cuenta que la soja tiene forma redondeada, se puede calcular el diámetro equivalente esférico de la partícula  $D_e$  (diámetro de una esfera del mismo volumen que la partícula):

$$D_e = \left( \frac{6V_p}{\pi} \right)^{1/3} \quad (5)$$

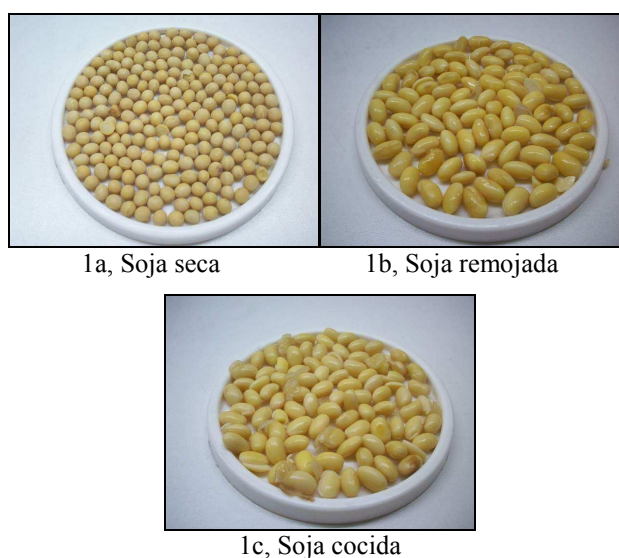
Al asumir geometría esférica, el diámetro equivalente coincide con el diámetro efectivo ( $D_p$ ) que es el utilizado en la Ec. tipo Ergun y corresponde al diámetro de una esfera de igual área por unidad de volumen que la partícula. Para la determinación de humedad, se compararon dos métodos de grano entero para oleaginosas, uno perteneciente al ASABE (American Association of Agricultural and Biological Engineers) (103 °C, 72 h) y el otro al SENASA (Servicio Nacional de Sanidad Agroalimentaria), Argentina (130 °C, 3 h). No se encontraron diferencias prácticas entre los mismos por lo que se decidió emplear el método más rápido. Con este fin, se utilizó una estufa de convección forzada (velocidad de aire de 0,25 m/s) y control automático digital. Cada determinación se realizó por triplicado y los resultados obtenidos se expresaron como kg de agua por kg de materia seca (kg  $H_2O$ /kg MS).

#### Acondicionamiento de las muestras

La soja se sometió a una limpieza manual para remover el escaso material extraño o fino que poseían las muestras. Para obtener la soja remojada, se lavó la soja cruda con agua caliente dos veces, posteriormente se puso en remojo en agua por 24 h en cámara de 10 °C, utilizando una relación másica de agua a soja de 2:1. Para la obtención de soja cocida, se lleva agua potable a ebullición, se le agrega la soja remojada, y se cuentan 40 minutos a partir del momento en que el sistema recupera el hervor.

Las sojas remojada y cocida, cuyas humedades eran de 58,08 y 59,90 % se pre-secaron en estufa de convección forzada a 50 °C hasta una humedad del 57 %, a efectos de eliminar la humedad superficial y facilitar su fluidización.

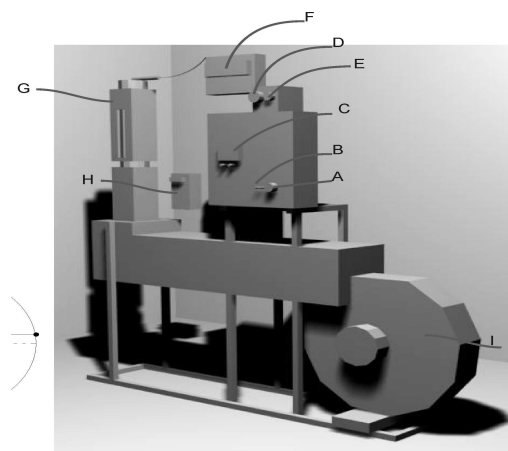
A continuación, en la **Figura 1**, podemos apreciar las fotografías de la soja cruda, remojada y cocida antes de ser sometidas al pre-secado, y posterior fluidizado. A partir de ellas podemos apreciar la diferencia de tamaño y forma que existe entre el estado inicial del producto y el obtenido después del remojo y la cocción.



**Figura 1.** Fotografías de Soja Cruda, Remojada y Cocida.

## Fluidización

Los tres productos se fluidizaron a temperatura ambiente en un equipo construido para este propósito. La cámara de secado tiene un diámetro de 0,10 m y una altura de 0,30 m. La altura del lecho fijo ( $L_0$ ) fue de 0,10 m. La **Figura 2** muestra un esquema del equipo.



**Figura 2.** Diagrama del equipo de secado en lecho fluidizado. Equipo de Fluidización: A-Botón de encendido, B-Controladores de resistencias, C-Visor digital, D- Encendido de ventilador, E- Regulador de velocidad, F- Anemómetro, G-Cámara de fluidización, H- Manómetro digital, I- Ventilador.

Las densidades ( $\rho_{L0}$ ) y porosidades de lecho fijo ( $\epsilon_0$ ) se determinaron para los tres materiales. La densidad de lecho fijo ( $\rho_{L0}$ ) se calculó conociendo la masa de sólidos en el lecho, la altura de lecho fijo y la sección transversal. Una vez conocida ésta la se calculó la porosidad de lecho fijo haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$\epsilon_0 = 1 - \frac{\rho_{L0}}{\rho_P} \quad (6)$$

La velocidad del aire ( $V_0$ ) se midió con un anemómetro de hilo caliente TSI Mod.1650 y las diferencias de presión ( $\Delta p$ ) del aire a través del lecho, con un micromanómetro TESTO 525 (Rango de medición, 25 milibar, error, 0,2% de fondo de escala), todas las experiencias se realizaron por triplicado.

Los valores reportados en las tablas incluyen el valor medio y su correspondiente desviación estándar.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización del grano

Las características de los tres materiales de soja empleados en la experiencia se detallan a continuación en la **Tabla 1**. Es evidente que la gran absorción de agua incrementa el diámetro equivalente de la soja remojada y cocida. La porosidad no varía con claridad y la densidad de partícula disminuye debido a la mayor presencia de agua.

**Tabla 1.** Características de los granos de soja seca, remojada y cocida.

Parámetros	Soja Seca	Soja Remojada	Soja Cocida
Humedad, kgH <sub>2</sub> O/kgMS	0,110 ± 0.001	1,450 ± 0.040	1,494 ± 0.016
Densidad, kg/m <sup>3</sup>	1,21 x 10 <sup>3</sup> ± 5.91	1,09 x 10 <sup>3</sup> ± 1.93	1,08 x 10 <sup>3</sup> ± 6.25
Volumen, m <sup>3</sup>	1,60 x 10 <sup>-7</sup> ± 2.04 x 10 <sup>-9</sup>	3,09 x 10 <sup>-7</sup> ± 2.41 x 10 <sup>-9</sup>	3,72 x 10 <sup>-7</sup> ± 1.07 x 10 <sup>-8</sup>
Diámetro, m	6,74 x 10 <sup>-3</sup> ± 2.85 x 10 <sup>-5</sup>	8,38 x 10 <sup>-3</sup> ± 1.91 x 10 <sup>-5</sup>	8,92 x 10 <sup>-3</sup> ± 8.53 x 10 <sup>-5</sup>

—X ± S

## Determinación de parámetros de lecho fijo

La porosidad ( $\epsilon_0$ ) y densidad de lecho fijo ( $\rho_{L0}$ ) se informan en la **Tabla 2**. Como se puede apreciar, la densidad de lecho fijo disminuye al aumentar el contenido de humedad, esto se debe al incremento de volumen de las partículas por la absorción de agua. Sin embargo, dada la variación comparable en densidad de partícula y lecho, la porosidad no cambia en forma clara.

**Tabla 2.** Parámetros de lecho fijo.

Parámetros	Soja Seca	Soja Remojada	Soja Cocida
$\rho_{L0}$ , kg/m <sup>3</sup>	744,66 ± 0.40	655,89 ± 0.09	680,62 ± 0.60
$\epsilon_0$	0,385 ± 0.003	0,399 ± 0.001	0,367 ± 0.004

—X ± S

## Determinación de los parámetros de la ecuación tipo Ergun

Se graficaron los valores de  $\Delta p/L_0$  vs  $V_0$ , y se observó el comportamiento en cada uno de los tres casos. La ecuación tipo Ergun (Ergun 1952) se ajustó a los valores experimentales de la zona de lecho fijo:

$$\frac{\Delta p}{L_0} = K_1 \frac{(1 - \epsilon_0)^2 \mu_a}{\epsilon_0^3 D_p^2} V_0 + K_2 \frac{(1 - \epsilon_0) \rho_a}{\epsilon_0^3 D_p} V_0^2 \quad (7)$$

Para resolver el sistema mediante regresión lineal, lo que facilita la identificación del comportamiento en lecho fijo, se divide la ecuación (7) por  $(1 - \epsilon_0)V_0$  y se la reordena quedando de la siguiente forma:

$$\frac{\Delta p}{L_0(1 - \epsilon_0)V_0} = K_1 \frac{(1 - \epsilon_0)\mu_a}{D_p^2 \epsilon_0^3} + K_2 \frac{\rho_a}{D_p \epsilon_0^3} V_0 \quad (8)$$

donde  $\Delta p$  es caída de presión a través del lecho, Pa;  $L_0$ , el espesor del lecho fijo, m;  $\epsilon_0$ , porosidad de lecho fijo;  $D_p$ , diámetro de la partícula, m;  $\mu_a$ , viscosidad del fluido, kg/m.s;  $V_0$ : velocidad superficial del aire, m/s;  $K_1$ , coeficiente laminar de la ec. (8), mientras que  $K_2$  es el coeficiente turbulento.

Ergun trabajó con partículas pequeñas de origen inorgánico y encontró  $K_1=150$  y  $K_2=1.75$ . Sin embargo, tales valores en realidad dependen de las características del producto.

Con los valores experimentales de  $\Delta p/L_0$  vs  $V_0$  obtenidos en cada producto se determinaron las constantes  $K_1$  y  $K_2$ , de la ecuación tipo Ergun por ajuste de la ec. (8), utilizando el método de cuadrados mínimos en una planilla Excel.

La velocidad experimental se corrigió multiplicando la misma por  $f_w$ , definido como factor de Coulson, que tiene en cuenta el efecto de pared del recipiente (Calvelo 1975).

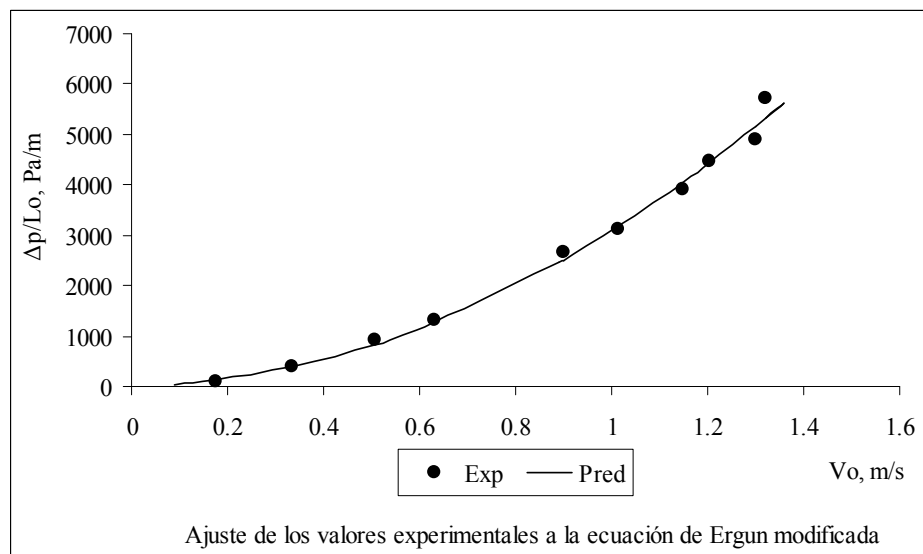
$$f_w = \frac{1}{\left[ 1 + \frac{\left( \frac{4}{D} \right)}{2 \left( \frac{6}{D_e} \right)} \right]^2} \quad (9)$$

donde el  $D$  representa el diámetro de la cámara de fluidización. Los valores de  $f_w$  para soja seca, remojada y cocida fueron, 0,956, 0,946 y 0,943, respectivamente.

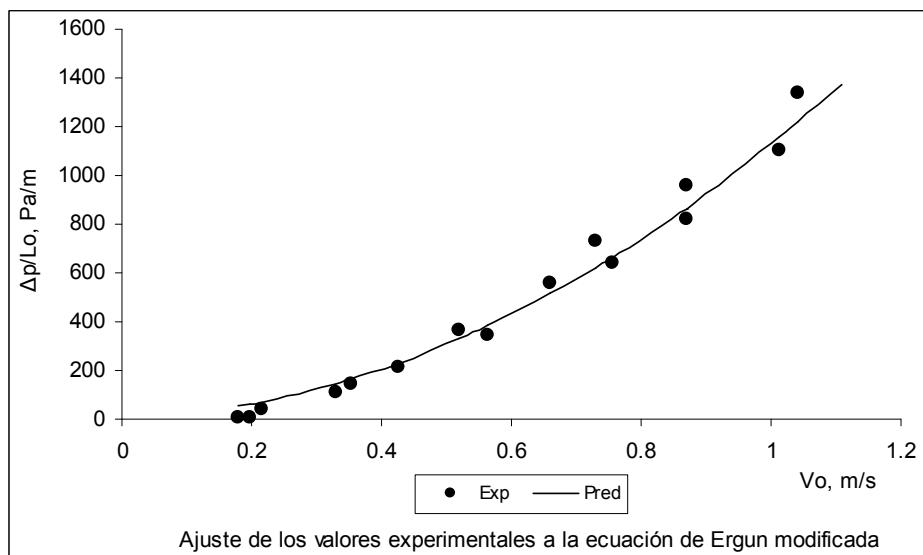
Como se mencionó anteriormente, el valor de los coeficientes laminar y turbulento es función de las características del producto como por ejemplo la forma y la rugosidad. La forma de los granos influye sobre la orientación de los mismos al formar el lecho y afecta a la sinuosidad e irregularidad de los canales. La rugosidad de los granos influye sobre la caída de presión del aire al circular a través del lecho de grano por dos razones: 1) un aumento de rugosidad en las paredes de los canales involucra un

aumento de  $\Delta p$ , 2) el aumento de rugosidad afecta a la superficie específica de los granos y por tanto al  $D_p$ . Escardino et al. (1970) trabajando en diversos productos como arroz cáscara, arroz elaborado, cebada, trigo y maíz, informó valores de 242 a 867 para el coeficiente laminar y de 3,17 a 6,54 para el turbulento, muy superiores a los obtenidos por Ergun, lo cual se corresponde con la elevada rugosidad presentada por estos productos. De acuerdo a lo establecido anteriormente, los menores valores para  $K_1$  y  $K_2$  reportados en este trabajo, se deben probablemente a la escasa rugosidad del tegumento de los granos de soja, en especial cuando están remojados y cocidos.

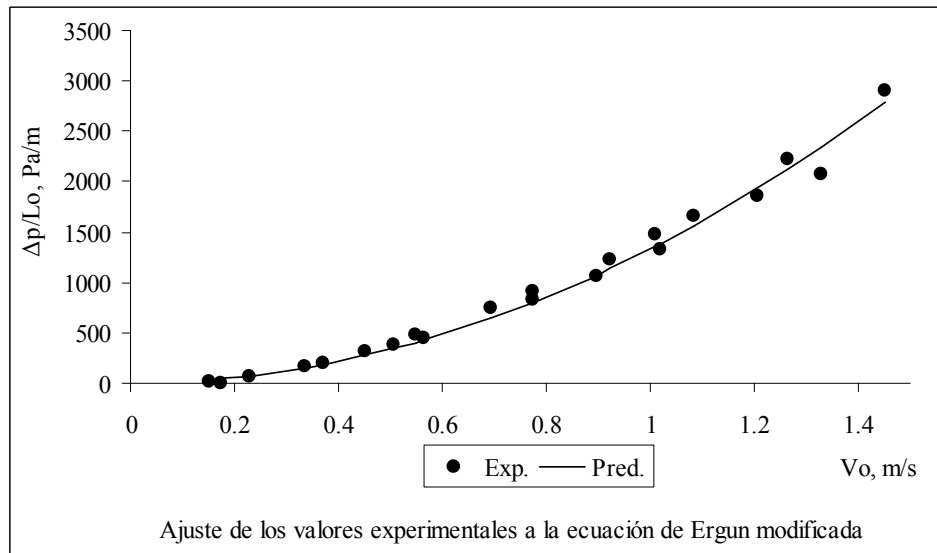
En la **Figura 3a**, **3b** y **3c** se ponen de manifiesto los valores experimentales obtenidos de  $\Delta p/L_0$  vs  $V_0$  y la ecuación tipo Ergun modificada de acuerdo a los parámetros obtenidos anteriormente. Como puede observarse en todos los casos existe una mejor predicción en condiciones de lecho fijo, a bajas velocidades. En la **Figura 3d**, se observa lo predicho a lo largo de todo el proceso, en el rango completo de velocidades. A partir de estos gráficos se puede concluir que, a igual valor de  $V_0$ , los valores de  $\Delta p$  fueron mayores en soja cruda que en soja remojada y cocida.



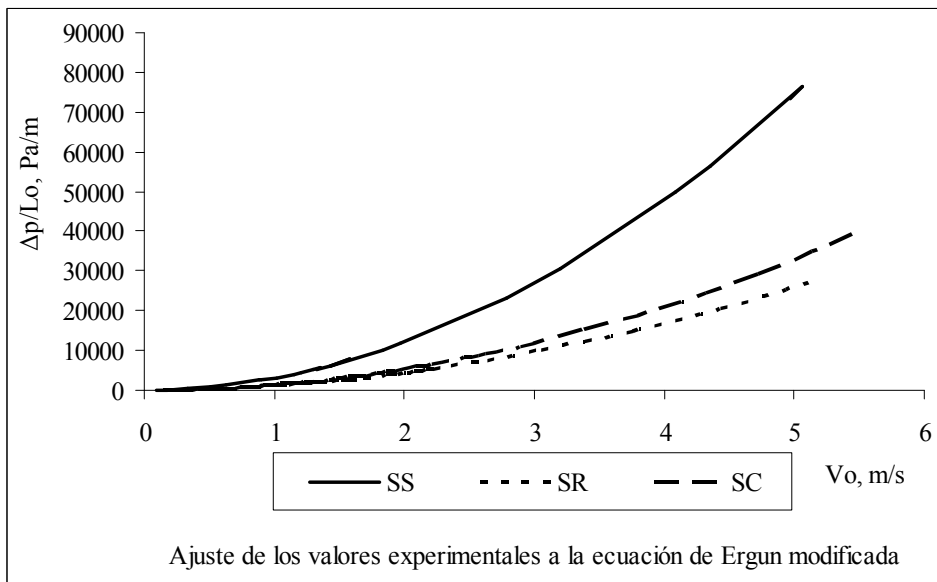
**Figura 3a.** Soja seca.



**Figura 3b.** Soja remojada.



**Figura 3c.** Soja cocida.



**Figura 3d.** Experiencia completa.

### Determinación de la $V_{mf}$

Con los valores de  $K_1$  y  $K_2$  obtenidos, se utilizó la ec. (7) (forma cuadrática clásica de Ergun). La velocidad  $V_{mf}$  se alcanza cuando la pérdida de carga  $\Delta p$  (multiplicada por la sección transversal) iguala el peso del producto en el fluido. Con este fin el peso neto de las partículas en el lecho se obtiene de la diferencia entre el peso de éstas y el empuje del fluido:

$$\Delta p S = (\rho_p - \rho_a) g (1 - \epsilon_{mf}) SL_0 \quad (10)$$

El lecho de partículas empieza a fluidizar cuando la pérdida de carga multiplicada por la sección transversal iguala el peso. Aproximando  $\epsilon_{mf} \approx \epsilon_0$ , dividiendo ambos miembros por  $SL_0(1 - \epsilon_0)$ , y haciendo las simplificaciones correspondientes, se obtiene

$$\frac{\Delta p S}{SL_0(1 - \epsilon_0)} = \frac{(\rho_p - \rho_a) g (1 - \epsilon_0) SL_0}{S(1 - \epsilon_0) L_0} = (\rho_p - \rho_a) g \quad (11)$$



si en el miembro izquierdo reemplazamos la ec. (7) para el cociente  $\Delta p / L_0$  se llega a una ecuación cuadrática

$$K_2 \frac{\rho_a}{D_p \epsilon_0^3} V_{mf}^2 + K_1 \frac{(1 - \epsilon_0) \mu_a}{D_p^2 \epsilon_0^3} V_{mf} - (\rho_p - \rho_a) g = 0 \quad (12)$$

donde  $V_{mf}$ : velocidad de mínima fluidización, m/s;  $\rho_a$ , densidad de fluido, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_p$ , densidad de partícula, kg/m<sup>3</sup>;  $g$ , constante de aceleración de la gravedad, 9,81 m/s.

Las menores densidades de partícula de la soja remojada y cocida respecto de aquella de la soja seca determinaron que las diferencias entre velocidades de mínima fluidización no fueran considerables. Los valores de  $V_{mf}$  resultaron 1,58, 2,53 y 2,43 m/s respectivamente. La fluidización observada se corresponde con la de lechos de partículas grandes, con burbujas de gran tamaño y alto grado de mezclado.

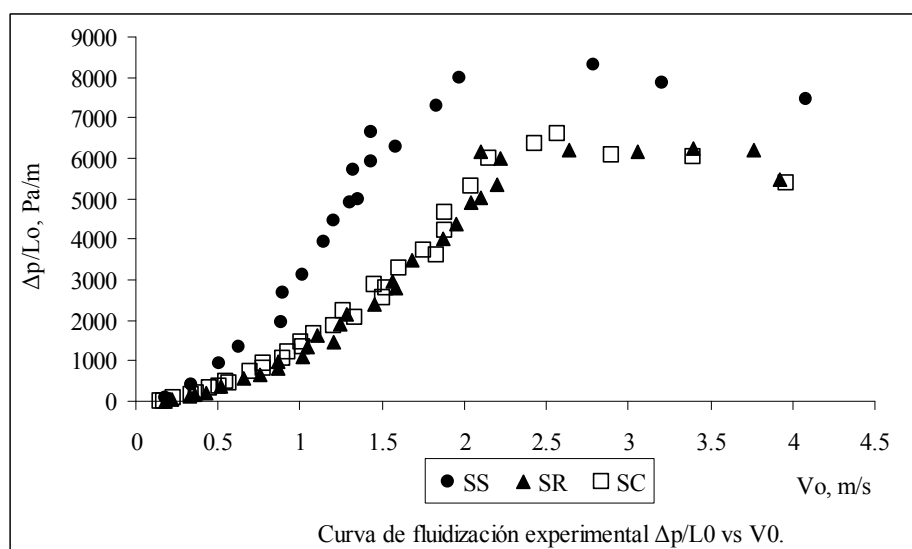
Los valores de velocidad de mínima de fluidización encontrados, para soja seca se encuentran dentro del rango informado en diversos trabajos por Soponronnarit et al. (2001), Kundu et al. (2001) y Taechapairoj et al. (2002). Los valores de los coeficientes así como también los valores de las  $V_{mf}$  se detallan a continuación en la **Tabla 3**.

**Tabla 3.** Determinación de constantes de la ecuación tipo Ergun y la  $V_{mf}$ .

Variedad de soja	$K_1$	$K_2$	$V_{mf}$ [m/s]
Seca	$54,70 \pm 2,40$	$1,54 \pm 0,14$	$1,58 \pm 0,07$
Remojada	$64,31 \pm 7,45$	$0,85 \pm 0,15$	$2,53 \pm 0,37$
Cocida	$11,32 \pm 4,06$	$0,78 \pm 0,32$	$2,43 \pm 0,49$

$X \pm S$

En la **Figura 4**, se pueden apreciar los valores experimentales  $\Delta p / L_0$  vs  $V_0$  para los tres tipos de soja, durante todo el proceso. Es evidente la diferencia que existe entre la soja cruda, y la soja remojada y cocida, este fenómeno probablemente se debe al efecto que ejerce el incremento del diámetro y volumen de partícula. Al tener una mayor densidad, pero un menor volumen y diámetro de partícula la soja cruda alcanzó valores elevados de  $\Delta p / L_0$  en lecho fijo, con respecto a los de la soja remojada y la soja cocida. Por esta razón, y a pesar de sus menores densidades de partícula, los valores de  $V_{mf}$  aumentaron en soja remojada y cocida.



**Figura 4.** Curvas de Fluidización experimental.

### Efecto de la temperatura en la $V_{mf}$ .

Finalmente, el efecto de la temperatura en la velocidad de mínima fluidización se puede estimar con la ecuación tipo Ergun (Ec. 16) en base al conocimiento de la dependencia de la densidad y viscosidad del aire con la temperatura :

$$\rho_a = \frac{pPM}{RT_k} \quad (13)$$

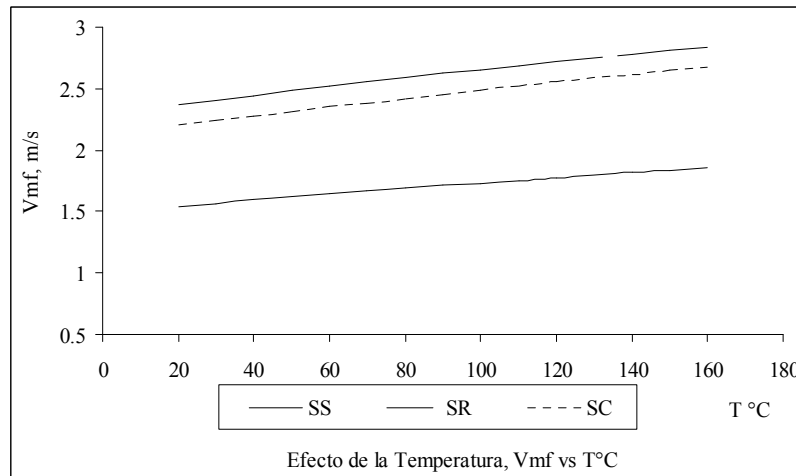
$$\mu_a = 1.735 \times 10^{-5} + 4.318 \times 10^{-8} T_C \quad (14)$$

$$K_2 \left( \frac{pPM}{RT_k} \right) V_{mf}^2 + K_1 \frac{(1-\epsilon_{mf})(1.735 \times 10^{-5} + 4.318 \times 10^{-8} T_C) V_{mf}}{D_p^2 \epsilon_{mf}^3} - \left( \rho_p - \left( \frac{pPM}{RT_k} \right) \right) g = 0 \quad (15)$$

$$V_{mf} = \frac{- \left( K_1 \frac{(1-\epsilon_{mf})(1.735 \times 10^{-5} + 4.318 \times 10^{-8} T_C)}{D_p^2 \epsilon_{mf}^3} \right) + \sqrt{\left( K_1 \frac{(1-\epsilon_{mf})(1.735 \times 10^{-5} + 4.318 \times 10^{-8} T_C)}{D_p^2 \epsilon_{mf}^3} \right)^2 - 4 \left( K_2 \frac{pPM}{D_p \epsilon_{mf}^3} \right) (\rho_p - \rho_a) g}}{2 \left( K_2 \frac{pPM}{D_p \epsilon_{mf}^3} \right)} \quad (16)$$

donde p: es la presión en Pa; PM, peso molecular del aire, 29 kg/kmol; R, constante de los gases, 8314 J/kmol K;  $T_k$ , temperatura en grados Kelvin, °K;  $T_C$ , temperatura, °C.

A partir de dicha relación, se evaluó la influencia de la temperatura en las  $V_{mf}$  de los tres materiales, en un rango de temperaturas de 20 a 160 °C, como se puede visualizar en el **Figura 5**.



**Figura 5.** Efecto de la temperatura  $V_{mf}$  vs  $T^{\circ}\text{C}$ .

Los resultados teóricos muestran que a medida que se incrementa la temperatura la velocidad de mínima fluidización aumenta, encontrando para la soja seca, remojada y cocida a 160 °C valores de 1,85, 2,89 y 2,67 m/s respectivamente, lo que implica un incremento promedio de 20% con respecto a los valores determinados a 20 °C.

Los gráficos aquí presentados son muy útiles para conocer las características de la fluidización de estos tres productos, sobre todo en los casos donde no es posible la observación directa del lecho. Esto permitirá conocer las velocidades operativas del lecho fluidizado, y, asimismo, facilitará la selección del ventilador del equipo y su costo.

## CONCLUSIÓN

A igual valor de  $V_0$ , los valores de  $\Delta p$  en lecho fijo fueron mayores en soja cruda que en soja remojada y cocida. Sin embargo, las menores densidades de partícula de estas últimas amortiguan en cierto modo la diferencia de velocidades de mínima fluidización ( $V_{mf}$ ), de 1,58 para soja seca, 2,53 en soja cocida y 2,43 m/s en soja remojada.

Los coeficientes laminar y turbulento de la ecuación tipo-Ergun fueron de 54,7 y 1,54, respectivamente para la soja seca, de 64,31 y 0,85 en soja remojada y de 11,32 y 0,78 en soja cocida. Tales valores fueron menores que los coeficientes originales de la ecuación de Ergun (150 y 1,75), posiblemente por la escasa rugosidad del delicado tegumento de los granos de soja, especialmente cuando están remojados o cocidos.

La velocidad de mínima fluidización se incrementa aproximadamente un 20% entre 20 y 160 °C. Por tanto, al pasar de grano remojado y cocido al tostado seco a elevadas temperaturas, la  $V_{mf}$  deberá reducirse gradualmente, de 2,9 a alrededor de 1,8 m/s, lo que requerirá control manual o automático, a efectos de ahorrar energía.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Calvelo A. 1975. Fluidodinamica. Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de La Plata. Curso de Reducción. Instituto Argentino de Siderurgia, Buenos Aires.

Consejo Nacional de Coordinación de Políticas Sociales. Consideraciones sobre la soja en la alimentación, Febrero 2003 Website:

[http://www.a-campo.com.ar/espanol/el\\_tema/DocumentofinalSOJApolicassociales.pdf](http://www.a-campo.com.ar/espanol/el_tema/DocumentofinalSOJApolicassociales.pdf) 23/4/09.

De Dios CA. 1996. Secado de granos y secadoras. FAO Santiago, Chile 1996. Web site: <http://www.fao.org/docrep/X5028S/X5028S0E.HTM>. 23/04 /09.

Ergun S. 1952. Fluid Flow through Packed Columns. Chemical Engineering Progress, 48: 89-94.

Erickson D R. 1995. Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization. St. Louis, Missouri. pag 9.

Escardino A, Ruiz F, Barbero P. 1974. Circulación de aire a través de lechos formados por granos de cereales. Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos, 10: 528-539.

Giner SA, Borrás F, Robutti JL, Añon MC. 1994. Drying rates of 25 argentinian varieties of soybeans: A comparative study. LWT Food Science and Technology, 27: 308-313.

Kitic D, Viollaz PE. 1984. Comparison of drying kinetics of soybeans in thin layer and fluidized beds. Journal of Food Technology 19, 399-408.

Kundu KM, Datta AB, Chatterjee PK. 2001. Drying of Oilseeds. Drying Technology, 19 (2): 343-358.

Osella CA, Gordo NA, González RJ, Tosi E, Ré E. 1997. Soybean Heat-treated using a Fluidized Bed. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, 30: 676-680.

Prachayawarakorn S, Prachayawasin P, Soponronnarit S. 2006. Heating process of soybeans using hot-air and superheated-steam fluidized-bed dryers. LWT Swiss Society of Food Science and Technology, 39: 770-778.

Secretaria de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. Web site: <http://www.sagpya.mecon.gov.ar/>. 23/04/09.

Soja. Eficiencia de Cosecha y Postcosecha. INTA-PRECOP, Manual Técnico No3. Editores Ing.Agr.Mario Bragachini, Ing.Agr.Cristiano Casini. ISSN 1667-9199. Web site: <http://www.cosechaypostcosecha.org/data/pdfs/soja2005.asp>; 23/04/09.

Soponronnarit S, Swasdisevi T, Wetchacama S, Wutiwiwatchai W. 2008. Fluidised bed drying of soybeans. *Journal of Stored Products Research*, 30 (2): 133-151.

Taechapairoj C, Dhuchakallaya I, Soponronnarit S, Wetchacama S, Prachayawarakorn S. 2003. Superheated steam fluidised bed paddy drying. *Journal of Food Engineering*, 58: 67-73.